

Моделирование отражения электромагнитной волны от влажной почвы с учетом дисперсии, гетерогенности и шероховатости поверхности

Д.Н. Панин , О.В. Осипов 

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, г. Самара,
ул. Л. Толстого, 23

Аннотация – Обоснование. Учет температуры, состава почвы, шероховатости поверхности и зависимость эффективной диэлектрической проницаемости от частоты позволяет более точно оценивать влажность почвы и другие важные параметры, что может быть использовано в различных областях, таких как сельское хозяйство, геология, экология и гидрология. **Цель.** В данной работе проводится расчет отражения электромагнитной волны линейной поляризации от влажной почвы с учетом физических факторов: гетерогенности структуры почвы, шероховатости поверхности и дисперсии. **Методы.** На основе гетерогенной математической модели влажной почвы, учитывающей дисперсию диэлектрической проницаемости воды и шероховатость поверхности, выводятся выражения для комплексных коэффициентов отражения электромагнитной волны вертикальной и горизонтальной поляризации. **Результаты.** В качестве объекта исследования выбрана модель рыхлой влажной почвы со среднеквадратичным отклонением шероховатостей на поверхности. Проведен анализ частотных, угловых характеристик модулей коэффициентов отражения при фиксированном уровне влажности почвы. **Заключение.** Полученные в результате расчетов данные являются ценным инструментом для дальнейшего улучшения методов дистанционного зондирования Земли и способствуют развитию новых технологий мониторинга почвенных параметров с использованием беспилотных летательных аппаратов, что открывает перспективы для более точного и эффективного анализа состояния земельных ресурсов и экосистем.

Ключевые слова – метаматериал; электромагнитная волна; влажность почвы; коэффициент отражения; гетерогенная модель; дистанционное зондирование Земли; шероховатость поверхности; дисперсия.

Введение

В связи с ускоренным ростом технологических процессов производства сельскохозяйственной индустрии появляется необходимость в измерении влажности почвы дистанционным способом в режиме реального времени [1; 2]. Существующие методы определения влажности почвы в основном являются контактными и имеют различную трудоемкость и погрешность [3]. Для дистанционных оценок влажности почвы широко используются данные радиолокаторов с синтезированной апертурой, которые позволяют оценить влагосодержание в почве [4; 5]. Однако такие оценки могут сталкиваться с трудностями из-за различных факторов, таких как неоднородный состав почвы, влияние температуры и растительного покрова. Для улучшения точности и достоверности оценок влажности почвы предлагается новый подход, основанный на математической модели влажной почвы с использованием концепции искусственных метаматериалов [6–8]. В данной работе рассматривается адаптация модели метаматериала на влажную почву, где сухая почва выступает контейнером, а включения – областями с неизвест-

ной влажностью. Целью построения такой математической модели является анализ отражения электромагнитной волны от влажной почвы с учетом дисперсии и шероховатости поверхности. Для этого применена гетерогенная модель Максвелла-Гарнетта [9], учитывающая дисперсию диэлектрической проницаемости воды в почве. Использование подобных математических моделей может значительно улучшить эффективность дистанционного зондирования влажности почвы и предоставить более точные данные для сельскохозяйственных процессов.

1. Гетерогенная математическая модель комплексной диэлектрической проницаемости влажной почвы с учетом дисперсии

Влажная почва рассматривается как гетерогенная среда, состоящая из твердой матрицы (сухая почва) с порами, заполненными водой (рис. 1). Комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) сухой почвы ϵ_c может быть рассмотрена как проницаемость твердой матрицы, которая является постоянной для определенного типа по-

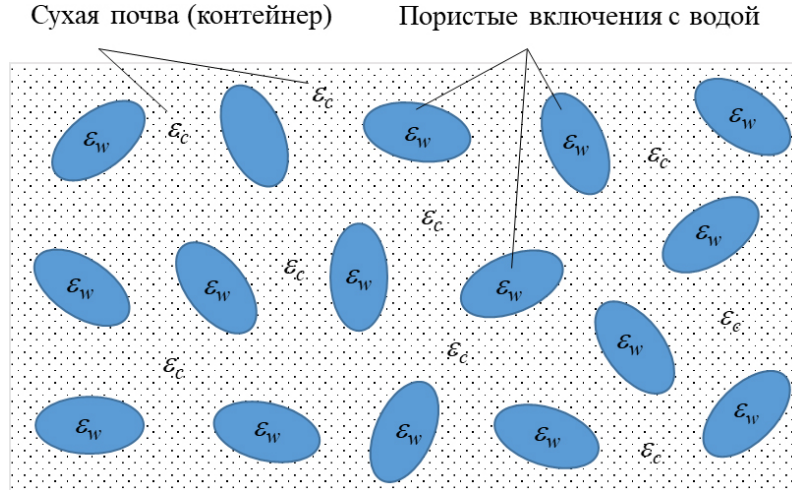


Рис. 1. Влажная почва как двухкомпонентная гетерогенная система
Fig. 1. Wet soil as a two-component heterogeneous system

чвы. КДП чистой воды ϵ_w , однако, зависит как от частоты f , так и от температуры T .

Выражение для эффективной КДП влажной почвы на основе гетерогенной модели Максвелла Гарнетта можно записать в следующем виде:

$$\epsilon_{эфф}(f, T, W) = \epsilon_c \frac{1 + 2\alpha(W)\epsilon_x(f, T)}{1 - \alpha(W)\epsilon_x(f, T)}; \quad (1)$$

$$\epsilon_x(f, T) = \frac{\epsilon_w(f, T) - \epsilon_c}{\epsilon_w(f, T) + 2\epsilon_c},$$

где $\alpha = W\rho_{dw}$ – концентрация влажных компонент в почве; W – влажность почвы; ρ_{dw} – нормированная плотность сухой почвы.

КДП чистой воды в общем виде описывается выражением

$$\epsilon_w(f, T) = \epsilon'_w(f, T) - j\epsilon''_w(f, T), \quad (2)$$

где $\epsilon'_w(f, T)$ – вещественная часть КДП воды; $\epsilon''_w(f, T)$ – мнимая часть КДП воды; j – мнимая единица.

Далее для компактности записи формул будем использовать упрощенные обозначения вещественной и мнимой частей КДП, полагая их зависимость от частоты и температуры: ϵ'_w , ϵ''_w .

Явный вид выражений для вещественной и мнимой части КДП чистой воды приведен в рекомендациях МСЭ [10] и записывается как

$$\epsilon'_w = \frac{\epsilon_s - \epsilon_1}{1 + \Omega_1^2} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_\infty}{1 + \Omega_2^2} + \epsilon_\infty; \quad (3)$$

$$\epsilon''_w = \frac{\Omega_1(\epsilon_s - \epsilon_1)}{1 + \Omega_1^2} + \frac{\Omega_2(\epsilon_1 - \epsilon_\infty)}{1 + \Omega_2^2}, \quad (4)$$

где

$$\Omega_1 = f/f_1; \quad \Omega_2 = f/f_2; \quad \epsilon_s = 77,66 + 103,3\beta;$$

$$\epsilon_1 = 0,0671\epsilon_s; \quad \epsilon_\infty = 3,52 - 7,52\beta;$$

$$\beta = 300/(T + 273,15) - 1,$$

а f_1 и f_2 – частоты релаксации Дебая, ГГц:

$$f_1 = 20,20 - 146,4\beta + 316\beta^2; \quad f_2 = 39,8f_1. \quad (5)$$

2. Отражение плоской электромагнитной волны от границы раздела «воздух – почва» при учете шероховатости поверхности

Рассмотрим задачу о наклонном падении плоской электромагнитной волны линейной поляризации на границу раздела «воздух – почва» с учетом шероховатости поверхности. Геометрия задачи приведена на рис. 2. Волна падает на границу раздела под углом θ . Область 1 представляет собой вакуум с проницаемостями $\epsilon_1 = 1$, $\mu_1 = 1$. Влажная почва (область 2) описывается материальными параметрами $\epsilon_{эфф}(f, T, W)$ и $\mu_2 = 1$. Для простоты обозначим эффективную диэлектрическую проницаемость влажной почвы как $\epsilon_{эфф}$.

Для учета шероховатости поверхности почвы была использована модель, предложенная в [11], в соответствии с которой коэффициенты отражения для волн горизонтальной R_e и вертикальной R_h поляризации вычисляются по формулам:

$$R_e = \frac{\cos\theta - \sqrt{\epsilon_{эфф} - \sin^2(\theta)}}{\cos\theta + \sqrt{\epsilon_{эфф} - \sin^2(\theta)}} \Psi(h, \theta); \quad (6)$$

$$R_h = \frac{\epsilon_{эфф} \cos\theta - \sqrt{\epsilon_{эфф} - \sin^2(\theta)}}{\epsilon_{эфф} \cos\theta + \sqrt{\epsilon_{эфф} - \sin^2(\theta)}} \Psi(h, \theta), \quad (7)$$

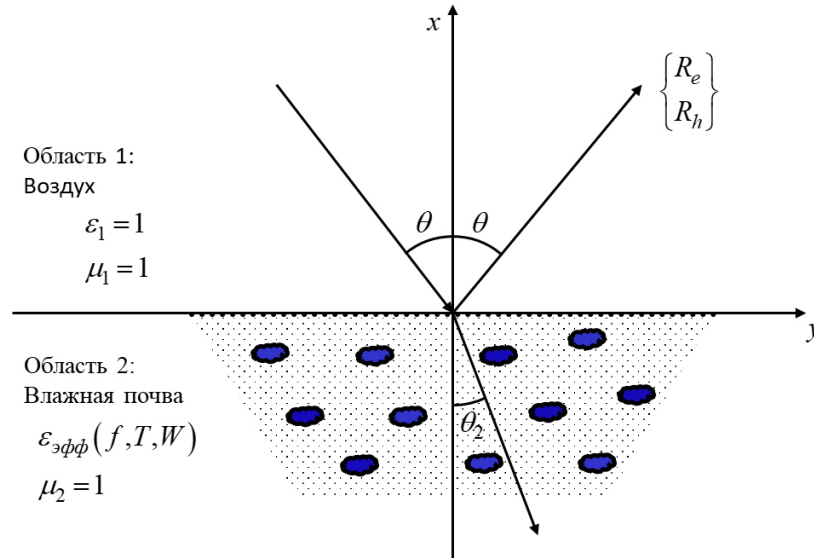


Рис. 2. Геометрия задачи
Fig. 2. Geometry of the problem

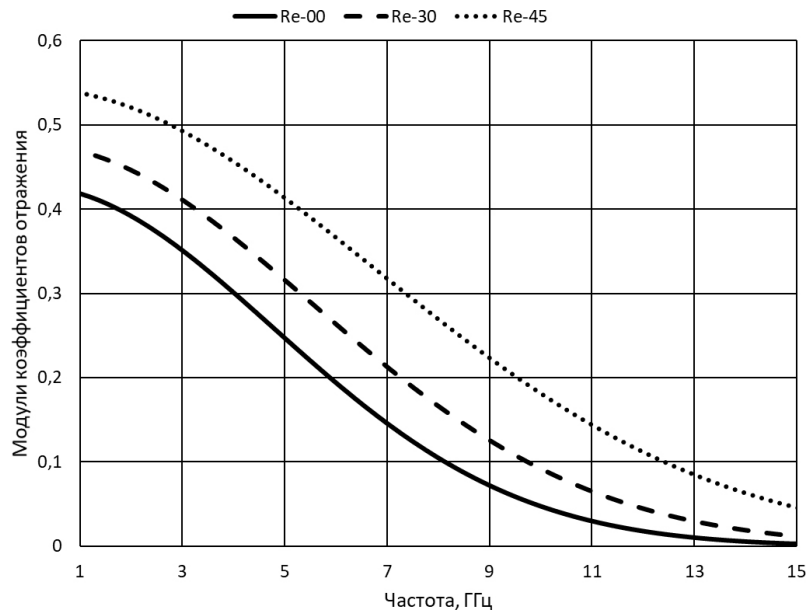


Рис. 3. Зависимости модулей коэффициентов отражения электромагнитной волны горизонтальной поляризации от частоты при различных углах падения

Fig. 3. Dependences of the absolute values of the reflection coefficients of an electromagnetic wave of horizontal polarization on frequency at different angles of incidence

где $\Psi(h, \theta) = \exp\left(-\frac{1}{2}h \cos^2 \theta\right)$.

В формулах (6) и (7), h – параметр шероховатости, который определяется следующим образом:

$$h = 4\sigma^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2, \quad (8)$$

где λ – длина электромагнитной волны; σ – среднеквадратичное отклонение шероховатостей на поверхности почвы.

Согласно [12], принимается: для слабо шероховатой поверхности $\sigma < 0,2$ см, для поверхности со

средней шероховатостью $0,2 \text{ см} \leq \sigma \leq 1 \text{ см}$, а для сильно шероховатой поверхности $\sigma > 1 \text{ см}$. Рассчитанные по формулам (6) и (7) значения коэффициентов отражения электромагнитной волны от почвы сравнивались с экспериментальными результатами, приведенными в работах [13; 14]. Существует хорошее соответствие теоретических зависимостей и экспериментальных значений коэффициентов отражений влажных и мерзлых почв на разных частотах, при различных влажностях почвы.

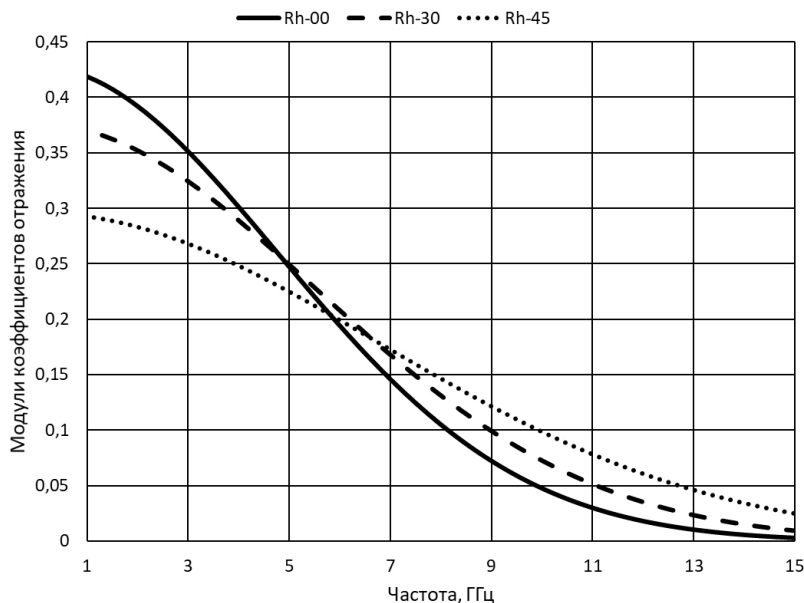


Рис. 4. Зависимости модулей коэффициентов отражения электромагнитной волны вертикальной поляризации от частоты при различных углах падения
 Fig. 4. Dependences of the modules of the reflection coefficients of an electromagnetic wave of vertical polarization on frequency at different angles of incidence

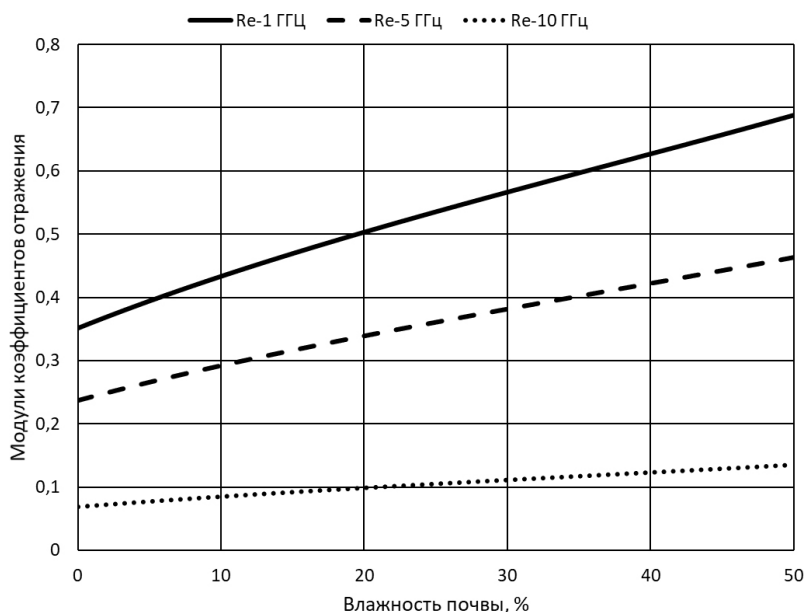


Рис. 5. Зависимости модулей коэффициентов отражения электромагнитной волны горизонтальной поляризации от влажности почвы на различных частотах
 Fig. 5. Dependences of the modules of the reflection coefficients of an electromagnetic wave of horizontal polarization on soil moisture at various frequencies

3. Результаты расчетов

В ходе расчетов рассмотрена модель рыхлой почвы $\rho_{dw} = 1,5$ (илистый суглинок) со средне-квадратичным отклонением шероховатостей на поверхности почвы $\sigma > 0,5$ см и температурой $T = 20$ °С. КДП проницаемость сухой почвы $\epsilon_c = 3,556 - j0,361$. На рис. 3 и 4 представлены графики расчетов модулей коэффициентов отражения плоской электромагнитной волны горизонталь-

ной и вертикальной поляризации в зависимости от частоты зондирующего излучения при фиксированном значении влажности почвы $W = 15$ % и углах падения: $\theta = 0^\circ$ – сплошная линия, $\theta = 30^\circ$ – пунктирная линия, $\theta = 45^\circ$ – точечная линия. Расчеты проведены в диапазоне частот от 1 до 15 ГГц.

Из графика на рис. 3 видно, что уровень отражения в случае горизонтальной поляризации растет с увеличением угла падения. Однако для случая

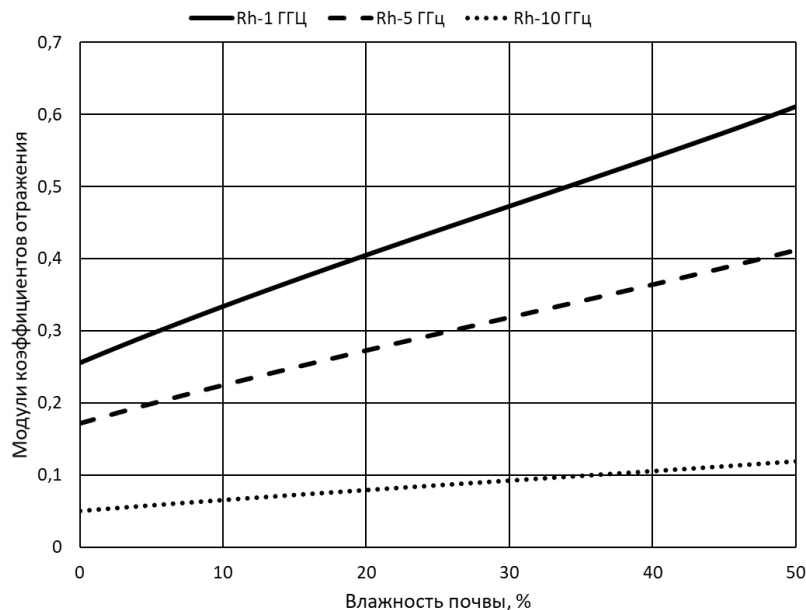


Рис. 6. Зависимости модулей коэффициентов отражения электромагнитной волны вертикальной поляризации от влажности почвы на различных частотах

Fig. 6. Dependences of the modules of the reflection coefficients of an electromagnetic wave of vertical polarization on soil moisture at various frequencies

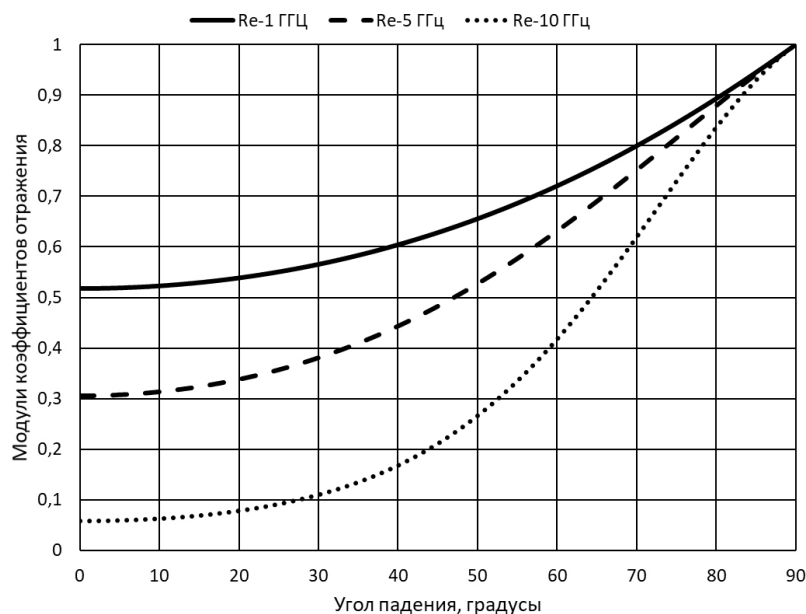


Рис. 7. Зависимости модулей коэффициентов отражения электромагнитной волны горизонтальной поляризации от угла падения на различных частотах

Fig. 7. Dependences of the absolute values of the reflection coefficients of an electromagnetic wave of horizontal polarization on the angle of incidence at various frequencies

вертикальной поляризации в интересующем нас диапазоне частот от 1 до 6 ГГц уровень отражения с увеличением угла падения убывает.

На рис. 5 и 6 представлены графики расчетов модулей коэффициентов отражения плоской электромагнитной волны горизонтальной и вертикальной поляризации в зависимости от влажности почвы при фиксированном значении угла падения $\theta = 30^\circ$ и частотах: 1 ГГц – сплошная ли-

ния, 5 ГГц – пунктирная линия, 10 ГГц – точечная линия.

Расчеты проведены в диапазоне изменения влажности почвы до 50 %. Из графиков, представленных на рис. 5, 6, видно, что с увеличением влажности почвы уровень отражения плавно возрастает.

На рис. 7 и 8 представлены графики расчетов модулей коэффициентов отражения плоской

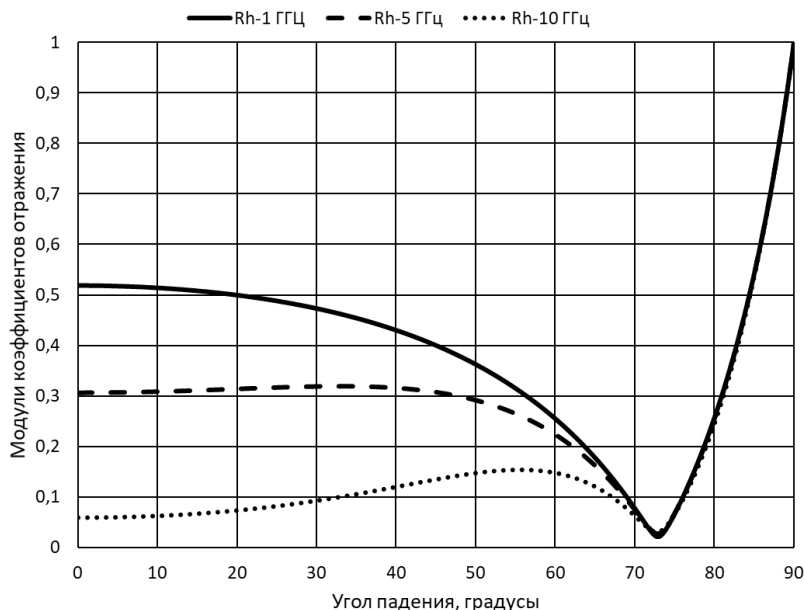


Рис. 8. Зависимости модулей коэффициентов отражения электромагнитной волны вертикальной поляризации от угла падения на различных частотах
Fig. 8. Dependences of the modules of the reflection coefficients of an electromagnetic wave of vertical polarization on the angle of incidence at various frequencies

электромагнитной волны горизонтальной и вертикальной поляризации в зависимости от угла падения при фиксированном значении влажности почвы $W = 30\%$ и частотах: 1 ГГц – сплошная линия, 5 ГГц – пунктирная линия, 10 ГГц – точечная линия.

Из графиков, представленных на рис. 7, 8, видно, что в случае горизонтальной поляризации с увеличением угла падения наблюдается рост уровня отражения электромагнитной волны, а в случае вертикальной поляризации отчетливо видно явление Брюстера при угле падения 74° .

Заключение

Полученные в работе результаты расчетов коэффициентов отражения электромагнитной волны от влажной почвы являются ценной информацией

для различных областей науки и промышленности. Они могут быть использованы для определения оптимального режима полива растений, контроля за водоотводными системами, разработки систем автоматизированного управления влажностью почвы в тепличном хозяйстве. Кроме того, эти данные могут быть полезны для экологов при изучении влияния влажности почвы на растительный покров и животный мир, а также для геологов при исследовании состава и структуры грунта. Результаты расчетов также могут быть применены для дистанционного зондирования земной поверхности с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Это открывает новые возможности для проведения мониторинга исследований почв и влажности земельных участков, а также оценки состояния экосистем.

Список литературы

1. Soil moisture retrieval from remote sensing measurements: Current knowledge and directions for the future / Z.-L. Li [et al.] // *Earth-Science Reviews*. 2021. Vol. 218. P. 103673. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103673>
2. A global near-real-time soil moisture index monitor for food security using integrated SMOS and SMAP / S. Sadri [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2020. Vol. 246. P. 111864. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111864>
3. Walker J.P., Willgoose G.R., Kalma J.D. In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques // *Journal of Hydrology*. 2004. Vol. 293, no. 1. P. 85–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.01.008>
4. Surface soil moisture estimation at high spatial resolution by fusing synthetic aperture radar and optical remote sensing data / N. Chen [et al.] // *Journal of Applied Remote Sensing*. 2020. Vol. 14, no. 2. P. 024508. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.024508>
5. Saline soil moisture mapping using Sentinel-1A synthetic aperture radar data and machine learning algorithms in humid region of China's east coast / J. Wang [et al.] // *Catena*. 2022. Vol. 213. P. 106189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106189>
6. Панин Д.Н., Осипов О.В., Безлюдников К.О. Расчет отражений плоской электромагнитной волны линейной поляризации от границы раздела «воздух – влажная почва» на основе гетерогенных моделей Максвелла-Гарнетта и Бруггемана //

- Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25, № 2. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.2.22-27>
7. Разработка математической модели кирального метаматериала на основе цилиндрических спиральных элементов с учетом дисперсии и концентрации / И.Ю. Бучнев [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2023. Т. 26, № 2. С. 36–47. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.2.36-47>
 8. Исследование антенных комплексов с использованием киральных метаматериалов и фрактальной геометрии излучателей для систем МИМО / А.Н. Беспалов [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 23, № 4. С. 97–110. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.4.97-110>
 9. Scattering of electromagnetic waves by helices and application to the modelling of chiral composites. II. Maxwell Garnett treatment / F. Guerin [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. 1995. Vol. 28, no. 4. P. 643. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/28/4/005>
 10. Рекомендация МСЭ-Р P.527-4 от 06/2017. Электрические характеристики земной поверхности. Серия Р. Распространение радиоволн. 2017.
 11. Effect of surface roughness on the microwave emission from soils / B.J. Choudhury [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1979. Vol. 84, no. C9. P. 5699–5706. DOI: <https://doi.org/10.1029/JC084iC09p05699>
 12. Schmugge T.J. Effect of texture on microwave emission from soils // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1980. Vol. GE-18, no. 4. P. 353–361. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.1980.350313>
 13. Jackson T.J., O'neill P.E. Salinity effects on the microwave emission of soils // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1987. Vol. GE-25, no. 2. P. 214–220. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.1987.289820>
 14. Влияние влажности и засоленности на радиоизлучение мерзлых почв в СВЧ-диапазоне / С.А. Комаров [и др.] // Исследование Земли из космоса. 1995. № 2. С. 22–30. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12753101>

Информация об авторах

Панин Дмитрий Николаевич, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники и связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия
Область научных интересов: теория волновых процессов и компьютерное моделирование в радиофизике.

E-mail: d.panin@psuti.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0598-8591>

SPIN-код (eLibrary): 9999-0844

AuthorID (eLibrary): 649577

ResearcherID (WoS): AAT-1882-2020

Осипов Олег Владимирович, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой высшей математики Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: электродинамика метаматериалов, антенны и устройства СВЧ, нелинейная оптика.

E-mail: o.osipov@psuti.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2125-9228>

SPIN-код (eLibrary): 2741-3794

AuthorID (eLibrary): 34872

ResearcherID (WoS): B-7134-2018

Physics of Wave Processes and Radio Systems

2027, vol. 27, no. 2, pp. 30–37

DOI [10.18469/1810-3189.2024.27.2.30-37](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2024.27.2.30-37)

UDC 532.537

Original Research

Received 1 March 2024

Accepted 2 April 2024

Published 29 June 2024

Modeling of electromagnetic wave reflection from wet soil taken into account of dispersion, heterogeneity and surface roughness

Dmitry N. Panin , Oleg V. Osipov 


Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
23, L. Tolstoy Street,
Samara, 443010, Russia

Abstract – Background. Taking into account temperature, soil composition, surface roughness and the dependence of effective dielectric constant on frequency allows a more accurate assessment of soil moisture and other important parameters, which can be used in various fields such as agriculture, geology, ecology and hydrology. **Aim.** In this work, we calculate the reflection of a linearly polarized electromagnetic wave from wet soil, taking into account such physical factors as heterogeneity of soil structure, surface roughness and dispersion. **Methods.** Based on a heterogeneous mathematical model of wet soil, taking

into account the dispersion of the dielectric constant of water and surface roughness, expressions are derived for the complex reflection coefficients of electromagnetic waves of vertical and horizontal polarization. **Results.** The model of loose wet soil with the standard deviation of roughness on the surface was chosen as the object of study. An analysis of the frequency and angular characteristics of the modules of the reflection coefficients was carried out at a fixed level of soil moisture. **Conclusion.** The data obtained as a result of the calculations is a valuable tool for further improving methods of remote sensing of the Earth and contributes to the development of new technologies for monitoring soil parameters using unmanned aerial vehicles, which opens up prospects for more accurate and efficient analysis of the state of land resources and ecosystems.

Keywords – metamaterial; electromagnetic wave; soil moisture; reflection coefficient; heterogeneous model; Earth remote sensing; surface roughness; dispersion.

✉ d.panin@psuti.ru (Dmitry N. Panin)

 © Dmitry N. Panin, Oleg V. Osipov, 2024

References

1. Z.-L. Li et al., “Soil moisture retrieval from remote sensing measurements: Current knowledge and directions for the future,” *Earth-Science Reviews*, vol. 218, p. 103673, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103673>.
2. S. Sadri et al., “A global near-real-time soil moisture index monitor for food security using integrated SMOS and SMAP,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 246, p. 111864, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111864>.
3. J. P. Walker, G. R. Willgoose, and J. D. Kalma, “In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques,” *Journal of Hydrology*, vol. 293, no. 1, pp. 85–99, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.01.008>.
4. N. Chen et al., “Surface soil moisture estimation at high spatial resolution by fusing synthetic aperture radar and optical remote sensing data,” *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 14, no. 2, p. 024508, 2020, doi: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.024508>.
5. J. Wang et al., “Saline soil moisture mapping using Sentinel-1A synthetic aperture radar data and machine learning algorithms in humid region of China’s east coast,” *Catena*, vol. 213, p. 106189, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106189>.
6. D. N. Panin, O. V. Osipov, and K. O. Bezlyudnikov, “The calculation of reflections of linear polarization plane electromagnetic wave from the boundary of the «air – wet soil» based on heterogeneous Maxwell Garnett and Brugheman models,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 25, no. 2, pp. 22–27, 2022, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.2.22-27>. (In Russ.)
7. I. Yu. Buchnev et al., “Development of a mathematical model of a chiral metamaterial based on a cylindrical helical elements accounting for the dispersion and concentration of elements,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 26, no. 2, pp. 36–47, 2023, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.2.36-47>. (In Russ.)
8. A. N. Bepalov et al., “Research of antenna complexes using chiral metamaterials and fractal geometry of radiators for MIMO systems,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 23, no. 4, pp. 97–110, 2020, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.4.97-110>. (In Russ.)
9. F. Guerin et al., “Scattering of electromagnetic waves by helices and application to the modelling of chiral composites. II. Maxwell Garnett treatment,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 28, no. 4, p. 643, 1995, doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/28/4/005>.
10. Recommendation ITU-R P.527-4 dated 06/2017. Electrical characteristics of the earth’s surface. Series R. Radio wave propagation, 2017. (In Russ.)
11. B. J. Choudhury et al., “Effect of surface roughness on the microwave emission from soils,” *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 84, no. C9, pp. 5699–5706, 1979, doi: <https://doi.org/10.1029/JC084iC09p05699>.
12. T. J. Schmugge, “Effect of texture on microwave emission from soils,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-18, no. 4, pp. 353–361, 1980, doi: <https://doi.org/10.1109/TGRS.1980.350313>.
13. T. J. Jackson and P. E. O’neill, “Salinity effects on the microwave emission of soils,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-25, no. 2, pp. 214–220, 1987, doi: <https://doi.org/10.1109/TGRS.1987.289820>.
14. S. A. Komarov et al., “The influence of humidity and salinity on radio emission of frozen soils in the microwave range,” *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, no. 2, pp. 22–30, 1995, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12753101>. (In Russ.)

Information about the Authors

Dmitry N. Panin, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, head of the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering and Communication, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia.

Research interests: theory of wave processes and computer modeling in radiophysics.

E-mail: d.panin@psuti.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0598-8591>

SPIN-code (eLibrary): 9999-0844

AuthorID (eLibrary): 649577

ResearcherID (WoS): AAT-1882-2020

Oleg V. Osipov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, head of the Department of Higher Mathematics, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia.

Research interests: electrodynamics of metamaterials, antennas and microwave devices, nonlinear optics.

E-mail: o.osipov@psuti.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2125-9228>

SPIN-code (eLibrary): 2741-3794

AuthorID (eLibrary): 34872

ResearcherID (WoS): B-7134-2018